

## Atomoid, Celloid, and Neuronoid: a way to Artificial Life.

## 4 D-9

稲吉 宏明\*  
電子技術総合研究所†

## 1 はじめに

AL(Artificial Life=人工生命)の研究[1]-[4]においては、「系の emergent behavior (出現する振舞い)」が重要である。これをもたらす方法として、系の大域的振舞いをトップダウン的にあらかじめ指定せずに、ボトムアップ的に系を構成する方法が考えられる。即ち、「システムの要素(=部品)の振舞いを決定する「局所的規則のみ」を記述/指定し、「要素(=部品)間の相互作用」を通じて要素集団(=系)の大域的振舞いが出現する系」を構成する、という方法である。本報告ではこのように構成される系として、

- Atomoid → Moleculoid;
- Celloid → Organismoid;
- Neuronoid → Brainoid;

の3つの研究を報告する。(→の左辺が設定される部品であり、右辺が目標とされる系である。これらの命名は、文献[5]に因んでいる。)

## 2 各研究の目標および方針

## 2.1 Atomoid for Moleculoid

AL研究における重要課題の一つに「生命起源の問題」がある。ただし、通常の生物学においては地球上の「既知/既存の生命体(life-as-we-know-it)」のみを対象としているのに対し、AL研究においては、「未知/未存の生命体(life-as-it-could-be)」—如何なる物質で構成されているように、また宇宙のどこに存在しようとするような生命体—が、研究対象である。故に、無機物質から生命を合成しようとして行なわれた「試験管内での生命合成」の実験(=原始の地球の大気成分等の環境を、人工的に試験管内に再構成して生命の出現を再現しようという実験)に対し、前記の「試験管」を万能シミュレータである「コンピュータ」に置き換えた研究はALの一領域である。

ここで重要な点は、AL研究においては、「系の従うべき物理/化学法則」を系の設計者が任意に設定できる点である。そのような系の例として、CA(=Cellular Automaton)が挙げられ、「自己複製するCA」といった興味深い研究もある[1]。しかしながら、現実世界では、エネルギー or 質量の保存則が成立しているのに対し、CAでは、「保存されるもの」が存在しないという欠点がある。

そこでこの点と、全ての生物は「原子のある組合せ」である、という事実(文献[6]では、自然の本質が「組み立て部品を作ること」にある点が指摘されている)を考慮して、Atomoid(原子もどき)の概念が生まれた。即ち、保存されるものとして、性質の異なる数種の部品(Atomoid)を設計し、それらの結合/離脱等の相互作用を通じて、「自己複製するもの」を探求する。設計のポイントは、「エネルギーのI/O規則の設定」であると思われる。(地球でもこれがあって初めて大気循環等のダイナミクスが出現する。I/Oなしでは、定常状態が不動点となった静的世界である。)

## 2.2 Celloid for Organismoid

以下に列挙される概念に基づいて、部品となる Celloid(細胞もどき)を設計し、それらの相互作用により Organismoid(有機体もどき)が出現する系を探求する。

- 遺伝子(オペロン)は ON/OFF 可能な“if-then rule”である。……if-partでは、「オペレータ遺伝子」により、「構造遺伝子が発現するための条件」が記述され、then-partでは、「構造遺伝子」により「条件が満たされた時に起きるべき行動/応答(生物の場合は生成されるべき蛋白質)」が記述されている。故に、Celloid間でのメッセージ(生物の場合の細胞間の伝達物質に相当)のやり取りを通じて、「ある条件が満たされたならば、細胞分裂する(又は細胞死する)」といった形態の“if-then rule”を用いれば、従来の“Graph Grammar”に代わる「生成発展系」が記述できる。
- genomeは、上記オペロンの集合=“if-then rule”の集まり(Network)である。
- 各 celloidは、同一の genome(=gene-set)を持つが、そのスイッチ状況(各遺伝子の ON/OFF 状況)の違いにより、「異種の役割に分化」する。……生物の場合では、各細胞は同一の genome を持つが、内部に存在する蛋白質等の物質の違いにより、眼、皮膚、髪等への分化が起こる。(内部物質の違いは、遺伝子の ON/OFF 状況の違いによりもたらされる。)

## 2.3 Neuronoid for Brainoid

上記一連の研究の最終目標とされるのが、Brainoid(脳もどき)であり、これはその部品たる Neuronoid(神経細胞もどき)間の相互作用を通じて出現が期待される機能(/構造)である。

従来のニューラルネットワーク(=NN)においては、その要素が「同一の動作規則に従う単一素子」であるのに対し、Neuronoidは、Celloid同様、genomeは同一でも、要素間相互作用による分化能力を持たせることにより、多様な素子が構成できる。

又、従来のほとんどの NN が、networkの構造をあらかじめトップダウン的に与えてしまっているのに対し、Neuronoidでは、Celloid同様、(ボトムアップ的な部品間の相互作用により)networkの構造を「可変」とすることが可能である。

初期目標として、・「条件反射」にみられる「シナプス可塑性(=細胞間伝達効率の変化)」、および・アミーバ等の「(形態的)可変構造」を参考にした「シナプス発芽(=細胞間の新規通信路の形成)」を想定している。

## 3 Celloid について

前記の Neuronoid の説明にも見られる通り、細胞間の相互作用により、各細胞が「自分の持つべき役割」を認識できることが重要である。故に細胞間のコミュニケーション能力が必要となる。この一例として、「位置情報」の伝達に基づく「パターン形成」(#1&#2)および、細胞間の「仲間/非仲間の認識」(#3)をとりあげる。初期ステップとしてこれらの「閉鎖系」版を以下に示す。代謝/増殖等のある「開放系」が、次のステップとなる。

\*Hiroaki INAYOSHI

†ElectroTechnical Lab.(ETL)

これら一連の Celloid の価値として、「全体の監督（指示者）無しに、Celloid 間の相互作用のみで大域的に見た秩序が自律的に形成される」点が挙げられる。

### 3.1 Celloid #1: LAS(Largest Available Space)

昆虫等の剛毛は、図1に見られるように、密度がほぼ一定となるように剛毛が生える。これは、最新の剛毛が「密度の最も低い辺り」＝「得られる空間の最も広い辺り」に出現することによる。上記のパターンをもたらしような位置情報を

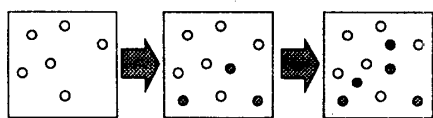


図1: LAS(Largest Available Space) の概念図

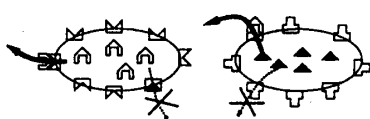


図2: 活性物質（左） & 抑制物質（右）の概念図

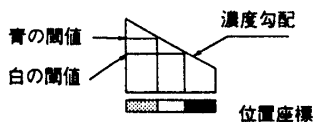


図3: モルホゲンの勾配を元にした三色旗のパターン

与える手法として文献 [7] では、図2のような、活性物質/抑制物質間の相互作用モデルが提案された。同文献のシミュレーションでは「濃度勾配による微分方程式」を用いたのに対し、本研究は、以下の特徴がある。

- unit(=cell) の導入：濃度勾配でなく、各 unit での活性/抑制物質の「I/O 規則」が記述される。
- “blind world” であるにも拘らず、各 unit が局所規則に従うことにより（＝隣接 unit 間での物質やり取りのみで）大域的秩序が出現する。
- on-going process である：unit の生成 & 消滅（世代交替）がある。

### 3.2 Celloid #2: FFP(French Flag Problem)

いわゆるモルホゲンの勾配を元にして細胞分化（色の選択）を行なわせると、図3のような、三色旗 (French Flag) のパターンを作ることができる。このためのモルホゲンの勾配を上記同様の細胞間相互作用により形成させるのが目標となる。[8]

### 3.3 Celloid #3: BOF(Birds Of a Feather)

異なる器官の細胞を擦り潰したものを混合して放置すると、同一器官由来の細胞同士は接着し、異なる器官由来の細胞同士は、接着しない現象が一般に生物細胞で見られる。これは、「鍵と鍵穴」の関係にあるような細胞接着分子を用いた、自己/非自己の認識機構と思われる。この機構は、Celloid を用いて何らかの「器官様構造」を構築する際に、重要なものとなる。

「鍵と鍵穴」のモデルは、「テンプレートマッチング」形式で実現可能（ただし3次元形状を考慮する場合はかなり複雑になるかもしれない）であり、Atomoid の結合/離脱等の相互作用にも適用できる。

## 4 現在の途中経過

3.1節の Celloid #1: LAS(Largest Available Space) に関して現在シミュレーションによりその密度の測定中である。図4は、400\*300の2次元格子中からランダムに{50,150,250}地点選んだ時の「密度（最近接ノードまでの距離）の分布」を示している。（横軸は距離、縦軸は相対的頻度で、分布の鋭さが秩序の程度を表す。）“expected”の分布に見られるような「大域的秩序の出現」を目指している。

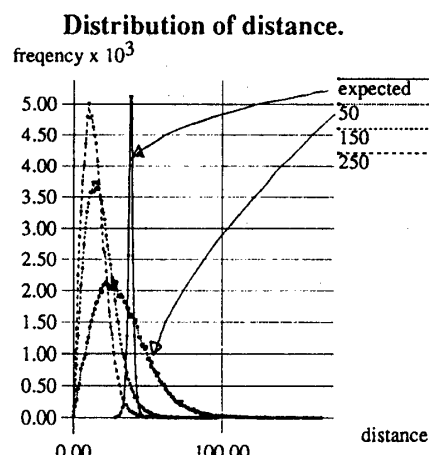


図4: 密度（最近接ノードまでの距離）の分布

## 5 むすび

ボトムアップのアプローチにより emergent behavior（出現する振舞い）を探求する研究として、・ Atomoid、・ Celloid、・ Neuronoid の3研究に関して、目標および方針を紹介し、特に Celloid に関する、現在の状況を報告した。

## 6 謝辞

本研究に関し御討論頂きました古谷室長はじめとする計算機構研究室ミーティングに参加されている皆様、また本研究の機会を与えていただいている弓場情報アーキテクチャ部長に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Langton C.(ed.) “Artificial life”, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Addison-Wesley, 1988.
- [2] Langton C., Taylor C., Farmer J.D., & Rasmussen S. (eds.) “Artificial life II”, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Addison-Wesley, 1991.
- [3] Meyer J.A. and Wilson S.W.(eds.) “From animals to animats”, MIT press, 1991.
- [4] Varela F.J. and Bourgine P.(eds.) “Toward a practice of autonomous systems”, MIT press, 1991.
- [5] Reynolds C.W., “Flocks, Herds, and Schools: a Distributed Behavior Model”, in Computer Graphics 21(4), pp. 25-34, (1987).
- [6] E. ルーベンスタイン「進化の階層構造」, 日経サイエンス 1989年8月号, pp.48-49.
- [7] A. ゴーラー「ヒドラにみる形態形成モデル」日経サイエンス 1975年1月号, pp.30-41.
- [8] L. ウォルバート「動物のパターン形成」日経サイエンス 1978年12月号, pp.78-91.